

综合管廊中电缆火灾原因及探测技术研究进展

王卫东^{1,2}, 万留杰^{1,2}, 张 静^{1,2}, 黄志杰¹

(1. 河南工学院 电缆工程学院, 河南 新乡 453003; 2. 河南省线缆结构与材料重点实验室, 河南 新乡 453003)

摘要:介绍了综合管廊中电缆火灾的起火机理、常用电缆火灾探测技术和电缆热解气体研究进展。在起火机理方面, 电弧和电缆线芯过热是综合管廊带电电缆起火的本质原因, 目前的研究多集中于外部热源导致的电缆材料燃烧, 而对于因电弧或电缆内部过热造成的电缆燃烧相关研究则比较匮乏。在综合管廊中电缆火灾探测技术方面, 总结了现有的火灾探测技术。根据火灾发展过程, 基于气体探测技术的火灾预警方法可以对电缆火灾进行早期预警。

关键词: 综合管廊; 电缆火灾; 气体探测

中图分类号: X45

文献标志码: A

文章编号: 2096-7772-(2024)01-0001-06

0 引言

综合管廊是将城市供水、燃气、热力、电力、通信等各类市政管线集约化、综合化敷设的隧道, 能够美化城市环境, 有效解决地下管线杂乱、地面交通拥堵等问题, 对于城市的绿色可持续发展具有重要支撑作用。在国家大力推动基础设施建设的大背景下, 综合管廊建设得以快速发展^[1]。

由电线电缆为骨架构成的电力、通信网络是国家重要的基础设施, 其安全性对经济发展和社会稳定有着极其重要的作用。随着大量电线电缆被纳入综合管廊统一管理, 电线电缆安全对综合管廊持续稳定运行的意义日益凸显。电缆在运行过程中, 会因为过载、短路、放电等原因导致故障发生, 而电缆绝缘、护层等结构中用到的诸如交联聚乙烯、聚氯乙烯、聚乙烯、聚丙烯等有机材料都是可燃或者易燃物, 电缆故障的热量极易引燃电缆, 进而引发管廊火灾。由于管廊的封闭性、隐蔽性等特点, 使管廊内电缆火灾呈现如下特点:

(1) 火灾难以被及时发现, 极易导致灾害扩大化, 引发管廊中燃气、供水、热力等供应中断, 严重时甚至导致城市“瘫痪”。

(2) 火灾中会产生大量烟雾和有毒有害气体, 救援非常困难。

(3) 剧烈火灾会产生大量导电性的碳和金属微粒, 难以排出、清理, 附着于管壁和廊内设备上, 易造成二次灾害发生^[2-4]。

(4) 火灾后的修复会在管廊内增加大量中间接头, 由于电缆中间接头是电缆运行中的薄弱环节, 这些接头会成为电缆故障或火灾的新隐患。

对综合管廊电缆火灾探测离不开对电缆火灾行为的研究, 目前国内对管廊内电缆火灾研究方法主要是借助外部火源, 在不带电电缆上进行, 由于实验系统的复杂性, 对于更接近实际情况带电电缆火灾的研究比较少^[5]。同时, 当前电缆火灾探测采集的多为中后期参量, 而针对可避免灾害扩大的早期预警参量研究较少。针对这种情况, 本文对综合管廊电缆运行状态监测和火灾的发生机理、火灾探测技术和电缆热解气体及检测技术的研究现状进行了调研, 以期为我国综合管廊电缆火灾预警的研究提供参考。

1 综合管廊中电缆起火原因

电缆发生故障后, 极可能导致线芯过热或产生电火花, 进而引燃电缆结构中的可燃物而形成火灾,

收稿日期: 2023-09-10

基金项目: 河南省科技攻关项目(222102240059); 河南省高等学校重点科研项目(21B470004); 河北省市场监督管理局科技计划项目(重点)(2021ZD04); 河南工学院高层次人才科研启动基金(KQ2108)

第一作者简介: 王卫东(1968—), 男, 河北邢台人, 副教授, 主要从事电缆制造及检测技术研究。

因此,分析综合管廊电缆的起火机理对电缆燃烧的早期行为研究和火灾预防具有重要意义。

燃烧必须具备三要素,即可燃物、氧化剂和引燃源。电缆的绝缘、填充、塑料护套等都是可燃物,管廊内空气中的氧气作为氧化剂,在炽热导体、电火花的热量作用下引起电缆燃烧^[6]。

国内外许多学者对电缆火灾的原因进行了大量的归纳和总结,总的来说可归纳为短路、过载(过电流/过负荷)、接触不良和外部热源^[7-25]。Babrauskas^[12]、张佳庆^[5]、杨晨^[26]等认为电弧、电缆线芯过热和外部热源是造成电缆起火的主要原因。由于综合管廊同外界环境基本隔离,其主要热源就是工作状态电缆的发热,所以忽略外部因素,只介绍电弧和电缆线芯过热两种起火原因。

1.1 电弧

由于电缆绝缘材料或制造的缺陷、受潮、受腐蚀等原因,会在电缆中产生电弧^[23],电弧本身具有较高的温度。Babrauskas在研究中发现,即使微小电流引起的电弧,其温度也能达到6500 K,在大电流下甚至可以达到上万K,这就超过了任何可燃物的燃点^[12],杨毅^[27]的研究结果也验证了这种观点。另外,电弧会使电缆中的高聚物分解产生 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 等易燃易爆气体,当这些气体的浓度达到爆炸下限时,在电弧的作用下,会引起爆炸^[23]。根据电弧发生的部位及原因,常见的情形有:

1.1.1 电缆中间接头中的电弧

电缆线路中存在大量的中间接头,其绝缘结构比电缆本体更为复杂,这成为电缆运行中的薄弱环节,据统计,电缆附件导致的故障占电缆总事故的70%以上,而中间接头故障又占其中的60%^[28-29]。中间接头产生电弧的可能原因如下:

(1)在制作电缆中间接头时,要将屏蔽层沿绝缘剥除一定的长度,半导电屏蔽断口处产生电场集中,由于施工人员素质良莠不齐,如果电缆中间接头的制作质量不高或接头受潮,就容易在该处产生放电电弧^[30-31]。

(2)电缆中间接头中导线连接处存在接触电阻,电流过大、接头松动或氧化等,会导致接触处温度升高,使绝缘劣化,绝缘电阻降低,继而引发电弧,严重时甚至会引起爆炸。

1.1.2 电缆绝缘中的电弧

电缆绝缘中的电弧形成有以下几方面的原因:

(1)电缆绝缘中存在气泡或杂质,会导致电场的集中,从而引发放电电弧。

(2)电缆绝缘受潮后,水分在电场作用下沿电场方向移动,形成水树枝,导致绝缘劣化、击穿。舒中俊等^[17]通过实验研究了不同环境湿度条件下过电流时线缆绝缘失效和击穿的时间,结论是随着湿度的增大,线缆绝缘的失效和击穿时间显著缩短。

(3)电缆的绝缘受腐蚀或电缆运输、敷设施工不当,使导体间绝缘电阻降低,从而在雷击、电源过电压甚至正常工作电压下绝缘被击穿,导致火灾或爆炸的发生^[11,13]。

1.1.3 其他原因产生的电弧

(1)由于交叉互联接地线断开,导致产生悬浮电位的金属护套对电缆支架放电,放电电弧会引燃邻近的高压电缆塑料外护套。

(2)电缆发生接地故障后,经消弧线圈接地的系统可长时间带故障运行,也会在高温放电电弧的作用下发生火灾^[19]。

1.2 电缆线芯过热

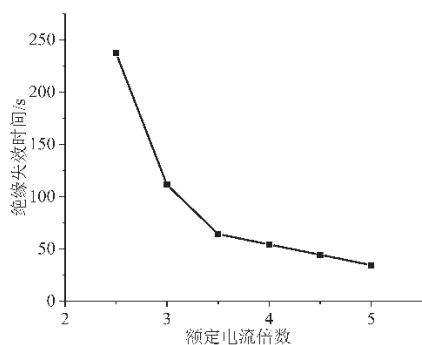
正常情况下电线电缆发热来自于电缆的损耗,即在交变电磁场的作用下,在导体、绝缘层、金属屏蔽层和铠装层中产生的功率损耗。这些损耗一方面消耗了传输的能量,一方面使电缆的温度升高^[32]。在电缆处于正常工作状态时,这些损耗产生的热量传导到电缆表面,并向外部散发,使电缆的温度稳定在安全范围内。但如果电路中电流过大(短路、过载)或导体接触不良,都会使电缆的损耗增大、发热增加,进而使电缆温度升高。如果散热条件不好,电缆温度持续升高^[5],当线芯的温度达到或超过电缆绝缘或护套的燃点时,就会引发电缆火灾。

(1) 短路

由于绝缘缺陷或损伤导致不同电位的导体接触,产生短路电流。短路电流会达到正常电流的几百甚至几千倍,从而导致导体的发热量急剧上升,由此产生的高温甚至使金属导体熔化,足以引发电缆火灾^[8]。

(2) 过载

导电线芯中的电流超过额定值时,电缆就处于过载状态。在过载状态下,导体的发热量增大,可能直接引发电缆火灾,而且会使绝缘受热劣化或熔融,而这又会引发短路,亦会引发火灾^[20]。舒中俊对不同过电流倍数的RVV-300/500 2×2.5电缆的绝缘失效时间进行了实验,图1是根据其实验数据做出的曲线,可以看出,随着过电流倍数的增大,绝缘的失效时间缩短,原因是随着额定电流倍数的增大,线芯的温度随之升高,绝缘劣化失效时间变短^[17]。

图1 绝缘失效时间与过载电流关系曲线^[17]

(3) 接触不良

由于电缆接头中的导体压接处存在接触电阻,接触不良时,接触电阻大,发热量大,过高的温升不仅会导致接触电阻持续增大,而且会导致压接处氧化或松动,反过来又使接触电阻增大,发热量更大,这样的恶性循环最终会导致电缆中间接头处温度升高乃至引发火灾。这种情况造成的电缆火灾因为不会造成电流的增大,隐蔽性很强,更容易造成严重后果。

综上所述,造成电弧和电缆线芯过热的原因并不是孤立的,更多情况下是相互诱发。比如电弧引起的爆炸会造成电缆短路,而线芯的过热会引起绝缘的劣化、失效,从而产生电弧,而电弧性短路也会使线芯过热等。

2 当前应用的电缆火灾探测技术

当前,在管廊电缆火灾探测技术方面,研究人员主要根据相关标准^[34-37],或借助燃烧测试仪器(如管式炉、锥形量热仪、微型量热仪等)^[35-45],或基于实际比例模型^[46-47],或利用仿真软件^[38,48-50]对电缆的燃烧开展实验,研究电缆的点燃时间和火灾中烟气的生成规律、热量释放速率、温度的变化,以及热辐射功率、电缆间距、放置角度、通风情况、环境氛围等对电缆燃烧行为的影响等。

电缆火灾会产生高温、烟气、火焰、声音等物理化学现象,以敏感元件为探测器件制成传感器,将火灾参量信息转化为电信号进行测量,是当前综合管廊火灾探测的主流技术^[53]。按照传感器探测范围不同,其又分为点型和线型。不同探测器对应的火灾参量如表1所示^[52-53]。

表1 火灾参量对应的传感器类型

传感器名称	火灾参量	类型
感烟探测器	烟雾	点型 / 线型
感温探测器	温度	点型 / 线型
感光探测器	红外 / 紫外 / 可见光	点型
声音火灾探测器	次声波	点型

2.1 感烟探测器

感烟火灾探测器是通过感知火灾中烟雾颗粒浓度变化进行火灾探测的一种方法。根据要求不同分为点型或线型探测器,是目前使用最为广泛的一种火灾探测器^[53]。

根据工作原理,感烟探测器又可分为离子型和光电型,前者通过感知烟雾对放射性元素产生的离子电流值或光线散射的影响来进行火灾探测。由于离子型感烟探测器需要专门的场所处理放射性材料,体积大、成本高,使其应用受限。当前光电型感烟探测器应用更广,该类探测器便于安装调试,但其灵敏度不高,很难探测到早期的火灾;另外,对环境湿度比较敏感,潮湿会引起误报;而且经常会由于灰尘或蚊虫的等因素产生误报^[54-56]。

2.2 感温探测器

火灾过程始终伴随着热量产生和温度升高,电缆舱中根据温度变化进行火灾探测的是感温探测器,其可以制成点型和线型,因此探测面更为广泛,最常用的是线型感温探测器,其又分为线型感温电缆和分布式光纤感温传感器。

按照 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》规定,线型感温火灾探测器应采用接触式的敷设方式对隧道内所有的动力电缆进行探测;线型感温火灾探测器应采用S形布置在每层电缆的上表面^[57]。

2.2.1 线型感温电缆

感温电缆的结构从原理上可理解为两根包覆有负温度系数热敏特性绝缘材料的金属导体绞合在一起,当感温电缆受热时,热敏特性绝缘破坏或绝缘材料电阻率发生变化,从而导致两根导体短路或导体间电阻发生变化,通过信号处理器发出报警信号。高温环境中,由于金属氧化和高聚物老化,其热敏特性随使用时间的增长而改变,不但会缩短使用寿命,也会造成误报警;受结构及探测机理的制约,单根感温电缆使用长度一般不超过100 m,所以其保护范围有限^[58-59]。

2.2.2 分布式光纤感温探测器

分布式光纤感温探测器基于温度对拉曼散射光的强度或波长的影响,得到整条光纤上的温度分布,继而判断是否发出报警信号。分布式光纤感温探测器具有长距离工作、抗电磁干扰、防爆等优点,但由于需要敷设大量的光缆,成本高,大范围推广应用存在一定困难;如采用接触式敷设,检修维护被保护电缆时的扰动易损坏光纤^[59],进而影响监控效果。

以上两种方法各有不足,限制了该技术应用的

广泛性。

2.3 图像型探测器

图像型火灾探测器是通过采集红外和可见光图像,对火焰或烟雾的颜色、形状、变化趋势、边缘特性等进行分析判断,实现火灾报警。图像监测具有直观性好、定位准确的优点,但图像监测像眼睛视物一样,无法探测到被遮挡的火焰、烟雾等,这种情况下待探测器发出预警信号时,往往火灾已不可避免^[60]。

2.4 声音探测器

燃烧时,燃烧介质内部分子受热碰撞产生的声压激发周围的空气媒质产生各种频率的震动,即声音。声音探测器可根据声音特征判断分析火灾是否发生。由于次声波波长长、频率低,具有传播距离远、能绕过障碍物、穿透性强等优点,不同物质燃烧时,都会产生这个频带的声音。因此,声音探测器可以燃烧产生的次声作为波检对象,判断火灾的发生。这种技术发展相对较晚,目前应用较少^[61]。

根据燃烧学理论,可燃物燃烧会经历吸热、热解、发烟、火焰扩散、剧烈燃烧以及衰减等六个阶段,其中前三个阶段属于火灾的早期阶段,后三个阶段属于燃烧阶段^[62]。前文所介绍的火灾探测技术中,感温探测器能够在电缆发热、产生异常升温阶段就能发出报警信号,具有预警功能,但受探测器布置位置限制,存在一定的漏报概率。在烟雾大量产生时,感烟探测器也能够报警,但一般是在发烟阶段,烟雾大量产生时,在可燃物热解阶段烟雾量小,极难发现异常,因此其预警时间短,火灾预防作用有限^[63]。其余2种探测器均基于燃烧发生后产生的物理化学现象发出报警信号,此时火灾已不可避免。

由于从发热到燃烧发生,一般需要几十分钟甚至更长的时间^[64]。在电缆本体升温过程中,绝缘、护层的高分子逐渐有分解气体产生,随温度升高,分解气体体积量增大,成分也更加复杂。这一过程中的分解气体,可以说是灾害前最早发出的预警信号。在电缆升温、材料热解阶段即采集气体信息,并据此发出预警信号,避免火焰产生是综合管廊电缆火灾防治预警技术的方向。

3 电缆热解气体检测法

结合综合管廊封闭性高、气体易聚集的特点,电缆热解气体检测法以产生的特征气体作为采集、分析对象,依据其变化发出正常、预警和火灾信号,该方法正日益成为当前研究热点。

有很多技术人员对常用电缆材料的热解产物进

行研究。舒中俊、王志滨^[39]利用傅里叶变换红外光谱仪对YJV电缆在不同热辐射强度作用下直至燃烧过程的烟气释放和主要有毒气体CO和HCl进行了实验研究,发现样品燃烧时,包含主要毒害气体CO和HCl的烟气产量和释放速率均随热辐射强度增加而上升,且HCl的释放量明显大于CO,并通过数值拟合,得到了CO和HCl释放量与燃烧时间之间的函数关系。

田原宇^[65]等使用傅里叶变换红外光谱仪研究了聚氯乙烯的热解过程,提出了聚氯乙烯的热解机理:首先脱出HCl气体,进一步产生共轭多烯、脂肪族化合物,部分多烯碎片会形成脂肪烃类挥发物质,另一部分聚合形成芳香族化合物,高温分解部分挥发物质,不可挥发物变成焦粒。

崔瑞^[66]采用气相色谱质谱联用仪对聚氯乙烯绝缘料在60℃~120℃进行低温热解,在60℃时释放出甲基氟气体,80℃时释放出异辛醇、乙酸乙酯,120℃时析出邻苯二甲酸二丁酯都属于易燃易爆性气体。随温度升高释放可燃气体的种类和浓度都在增加,火灾隐患逐渐增大。

SUN^[67]采用热重分析技术对PVC在氩气环境中的热解产物进行了实验研究,发现其在412℃达到分解速率的峰值,HCl、C₆H₆等分解气体的含量在416℃时达到最高。

欧振宇^[68]等利用热重分析的方法对取自废旧电缆的聚氯乙烯绝缘材料在氮气环境下进行热解,并对热解产物进行冷凝,对冷凝后得到的气体进行研究,发现聚氯乙烯绝缘材料的热分解反应主要温度区间为215℃~705℃,热解气经冷凝后主要成分为CH₄、CO₂、C₂H₆、C₂H₄、C₃H₆、CH₃Cl等。

张佳庆^[69]等人采用热重分析、元素扫描和热裂解-气相色谱质谱联用技术对取自低压阻燃电缆的阻燃聚氯乙烯护套材料进行了热解反应机理分析。发现其热解过程可分为534 K~623 K和670 K~800 K两个阶段。第一阶段的主要气体产物为HCl和苯,第二阶段主要产物为苯、苯乙烯、甲苯、茚、萘等芳香族化合物。阻燃聚氯乙烯护套材料分解以其组成中的PVC分解为主,主体产物与纯PVC类似,大量配合剂的加入对分解过程和产物影响不大。

万留杰^[70]等人对电缆用PVC护套材料进行了35℃~150℃高温热解研究,发现了CO₂、C₂H₆、C₂H₄、C₃H₈、C₃H₆、C₄H₁₀、CH₃Cl、2-C₄H₈、C₄H₆、C₅H₁₂、C₆H₆和CO等十余种热解气体,其中CO、CH₃Cl和CO₂浓度变化最为明显,适合作为PVC热解预警气体。

孔向荣^[71]等利用色谱-质谱仪对高压交联聚乙烯电缆在 80℃~180℃温度条件下的热解进行了研究,以苯甲醇和苯乙酮气体为研究对象,发现随温度升高,其在热解气体中的浓度增大。

陈鑫力^[72]利用差热重分析仪研究了废旧聚乙烯电线外皮的热解特性,试验结果表明:热解温度为 267℃~580℃,热解产物既有烃类大分子有机化合物,即碳原子油状有机物,也有烃类小分子有机化合物,同时还含有有机氯化物及 HCl。

随着气体检测方法的发展,基于气体检测的火灾预警研究越来越受到重视。国网江苏省电力科学研究院的张伟搭建了高压电力电缆隧道火灾烟气模拟与测量实验平台,研究后认为 CO 浓度可作为火灾早期预警的优选标志性参数,预警阈值设定为 10 ppm 较为适宜^[73]。中国科技大学的韩佳基于二氧化锡气体半导体传感器对聚氯乙烯电缆火灾早期产生的 2-乙基己醇气体进行了检测研究,在电缆温度 130℃时传感器即可产生预警响应值,预警时间要早于烟雾探测器间^[74]。中国科学技术大学的湛文佳使用半导体气体传感器对聚氯乙烯电缆火灾早期产生的气体进行了检测研究,认为在 200℃之前 DOP 蒸汽就使商业传感器产生明显响应,可以作为电缆火灾早期探测的特征气体^[75]。在孔向荣的研究中,使用电化学气体传感器对苯甲醇和苯乙酮进行检测,检测灵敏度达到了 1 ppmv^[71]。

当前,虽然还存在电缆分解气体浓度和成分与电缆本体温度量化对应依据不足的问题,但从越来越多的研究成果看,电缆热解气体探测技术在综合管廊火灾预警中的应用指日可待。

4 结论

本文综述并分析了综合管廊中电缆火灾的起火原因和探测方法,主要结论如下:

(1) 当前对电缆火灾研究多集中在外部热源作用下的火灾行为,如烟雾、火焰等中后期现象的监测,此时火灾已难以避免。

(2) 综合管廊环境封闭,电缆火灾主要由电弧和线芯过热等内因造成。发热过程会造成绝缘、护套分解,生成气体,管廊内空气流动性差,气体易集聚,因此,可根据分解气体成分和浓度变化等火灾早期现象进行管廊火灾预警研究。

(3) 目前对电缆热解气体产生规律的研究多针对电缆中的某一材料,与实际中电缆由复合材料构成的热解情况不符,还需要开展进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 陈刚,张培兴,王博冉,等.国内城市地下综合管廊文献计量可视化分析[J].建筑经济,2022(12):461-466.
- [2] 苏洪涛,黎继红,汪齐,等.综合管廊电缆火灾消防系统设计探讨[J].市政技术,2016,6(34):126-129.
- [3] 郭晓晖,杨志刚.电缆隧道火灾危害及其防范措施探讨[J].科技传播,2016,6:24-25.
- [4] 姜瑞洪.电力电缆发生火灾事故的原因和防范措施[J].科技与企业,2012(2):24-24.
- [5] 张佳庆,张博思,王刘芳,等.电线电缆带电燃烧研究进展[J].材料导报,2017,31(15):1-9.
- [6] 范明豪.变电站火灾风险分析与评估[M].北京:中国电力出版社,2013.
- [7] 魏治宇,蔡国宏.导线过负荷引燃能力的模拟实验研究[J].武警学院学报,2009,25(6):25-27.
- [8] 张学楷.低压线路短路火灾的机理及原因认定[J].建筑电气,2009,28(1):7-10.
- [9] 张红玲.电缆火灾成因及防火技术[J].科技与经济,2006(16):106-107.
- [10] 郭萍.电缆火灾的原因、特点及建议[J].上海消防,2000(6):41-42.
- [11] 曹玉立.电缆火灾的原因和预防[J].消防科学与技术,2005(S1):187-188.
- [12] BABRAUSKAS V. Research on electrical fires: The state of the art[J]. Fire Safety Science, 2008, 9(6):3-18.
- [13] 刘月朋.电力电缆火灾事故原因及对策[J].农村电工,2000(5):22.
- [14] 王红备,闫涛.电线电缆火灾的原因及防火对策[J].上海消防,2013(5):74-75.
- [15] 王冰.电线电缆火灾事故原因及预防措施[J].消防界:电子版,2016(6):21-21.
- [16] 李墨,孟祥斌.简述导线引起火灾的原因[J].中国科技信息,2010(9):89-90.
- [17] 舒中俊,李丽,张克俭,等.过电流对线缆绝缘破坏的影响[J].消防科学与技术,2012,31(5):450-453.
- [18] 张学楷.线路连接接触不良引发电气火灾的分析及其预防[J].建筑电气,1994(2):44-46.
- [19] 陈汉超,万家伟,方书博,等.高漏抗式消弧线圈的配电网单相接地故障状态研究[J].电工材料,2022(6):72-74.
- [20] 唐克,胡小亮.过载导线火灾危险性实验研究[J].消防技术与产品信息,2014(3):19-22.
- [21] 白晓斌,黄东利,李向明.高压电力电缆火灾原因分析及防范措施[J].电线电缆,2011(1):37-39.
- [22] 宋万俭,杨海林.交联聚乙烯电力电缆火灾原因分析及对策[J].冶金动力,2001(6):7-8.
- [23] ABDOLALL K, BUCHHOLZ V L, CARTLIDGE D M, et al. BC Hydro 15 kV cable explosion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2):302-307.
- [24] GONG T, XIE Q, HUANG X. Fire behaviors of flame-retardant cables part I: Decomposition, swelling and spontaneous ignition[J]. Fire Safety Journal, 2018, 95:113-121.

- [25] 陈明杰. 导线、电缆火灾事故原因及防范措施[J]. 农村电工, 2012(7):37-37.
- [26] 杨晨. 电气线路发热引起火灾的机理分析与预防对策[J]. 电气应用, 2014(6):90-93.
- [27] 李毅, 杨立新. 工厂电弧危险分析和人员防护[J]. 自动化信息, 2011(5):100-102.
- [28] 蒋晓娟, 梁惟钢, 夏俊峰, 等. 35kV 电力电缆冷缩式中间接头典型缺陷电场计算及故障分析[J]. 绝缘材料, 2015(11):59-63.
- [29] 刘波, 陈雷. 浅谈交联电缆接头故障原因及电缆接头安装注意事项[J]. 煤矿现代化, 2008(6):80-81.
- [30] 刘凤莲, 薛志航, 邓元实, 等. 220kV 高压预制式电缆中间接头故障分析与处理[J]. 四川电力技术, 2018, 41(1):5.
- [31] 胡泉伟, 王荣亮, 何金, 等. 一起 XLPE 电缆中间接头故障解体分析实例[J]. 电力与能源, 2018, 39(2):282-285.
- [32] 高云鹏, 谭甜源, 刘开培, 等. 电缆接头温度反演及故障诊断研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(2):535-542.
- [33] 公安部沈阳消防研究所. 火灾探测报警系统系列产品强制性国家标准宣贯教材[M]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [34] 陈南. 典型电缆中比例水平燃烧实验研究[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(1):4-8.
- [35] 舒中俊, 冯俊峰, 陈南, 等. PVC 电缆及其护套原料燃烧性能的对比[J]. 消防科学与技术, 2006, 25(2):247-249.
- [36] HULL T R, LEBEK K, PEZZANI M, et al. Comparison of toxic product yields of burning cables in bench and large-scale experiments[J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(2):140-150.
- [37] ANDERSSON P, ROSELL L, SIMONSON M, et al. Small and large scale fire experiments with electric cables under well-ventilated and vitiated conditions[J]. Fire Technology, 2004, 40(3):247-262.
- [38] 付强, 张和平, 杨华, 等. PVC 电缆全尺寸燃烧试验与数值模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2010, 10(3):157-161.
- [39] 舒中俊, 王志滨. YJV 电缆燃烧烟气及主要毒性产物[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(10):1356-1357.
- [40] 蔡伟, 杨明睿, 林运鑫. 电缆燃烧产烟影响因素的试验研究[J]. 安全与环境工程, 2009, 16(3):109-112.
- [41] 徐宁, 柳栋. 电缆燃烧烟气特性分析[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2012(21).
- [42] 曾建鹏, 胡定煜. 电线电缆燃烧产物的红外光谱分析[J]. 消防科学与技术, 2017(3):313-314.
- [43] 张佳庆, 范明豪, 李伟, 等. 防火电缆燃烧和毒性气体释放特性研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(8):72-77.
- [44] 付强, 张和平, 龚伦伦, 等. 基于 CONE 和 MCC 的典型电缆燃烧性能研究[J]. 火灾科学, 2012, 21(1):13-20.
- [45] MEINIER R, SONNIER R, ZAVALA P, et al. Fire behavior of halogen-free flame retardant electrical cables with the cone calorimeter[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 342:306-316.
- [46] 杜长宝. 地下综合管廊电缆火灾温度场分布及烟气流动特性分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- [47] 丁宏军. 电缆隧道火灾分析建模与线型感温火灾探测器研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [48] 彭玉辉. 典型电缆火灾条件下烟气运动规律的数值模拟[J]. 船海工程, 2016, 45(2):65-68.
- [49] 李文婷. 综合管沟电缆火灾数值模拟研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2012.
- [50] 吴龙标, 方俊, 谢启源. 火灾探测与信息处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [51] 杜建华, 张认成. 火灾探测器的研究现状与发展趋势[J]. 消防技术与产品信息, 2004(7):10-15.
- [52] 李苗, 刘敏, 唐葆华, 等. 电缆隧道火灾分析及计算机模拟[J]. 消防科学与技术, 2007, 26(6):603-607.
- [53] 金志成, 王凤英. 感烟火灾探测器的改进研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(12):87-92.
- [54] 秦科雁, 郑小波, 童潮镇. 电缆隧道消防报警系统的选择[J]. 消防技术与产品信息, 2003(11):28-32.
- [55] 蔡宙, 童浩, 陆嘉, 等. 核电厂综合管廊内火灾探测器对比研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(4):490-493.
- [56] 谢启源, 袁宏永, 吴龙标, 等. 潮湿引起感烟火灾探测器误报研究[J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(1):84.
- [57] 中华人民共和国公安部. 火灾自动报警系统设计规范: GB 50116—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [58] 戴文涛. 电缆隧道及综合管廊火灾探测报警技术研究[J]. 消防科学与技术, 2017, 36(1):89-92.
- [59] 陈健. 光纤测温系统在电力电缆中的研究和应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [60] 孙亮. 图像型火灾探测器应用浅析[J]. 中国交通信息化, 2016(3):122-123.
- [61] 余浩, 程科, 张自强. 基于次声波的火灾探测器[J]. 电子设计工程, 2023, 31(2):1-5.
- [62] 黄湘莹, 张认成, 杜建华. CO/CO₂ 体积分数分析在火灾早期探测中的应用[J]. 消防科学与技术, 2005, 24(5):588-591.
- [63] 祝玉泉. 调谐激光吸收光谱技术在典型灾害气体检测中应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- [64] 孔文俊, 王宝瑞, 劳世奇. 低压下导线绝缘层着火先期征兆研究[J]. 工程热物理学报, 2007, 28(6):1047-1049.
- [65] 田原宇, 吕永康. PVC 的热解 / 红外 (Py/FTIR) 研究[J]. 燃料化学学报, 2002, 30(6):569-572.
- [66] 崔瑞. 电气线路材料低温热解火灾敏感气体的识别研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.
- [67] SUN Q L, SHI X G, LIN Y L, et al. Thermogravimetric-Mass spectrometric study of the pyrolysis behavior of PVC[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 17(2):242-245.
- [68] 欧振宇, 韩俊伟, 焦芬, 等. 废旧 PVC 电线热重分析及热解试验研究[J]. 甘肃科学学报, 2023, 35(2):48-54.
- [69] 张佳庆, 过羿, 冯瑞, 等. 典型变电站阻燃低压电缆外护套材料火灾条件下热解固气产物特性及反应机理[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2021, 62(1):33-42.
- [70] 万留杰, 王卫东, 李康. PVC 热解特性研究[J]. 河南工学院学报, 2022, 30(3):25-29.
- [71] 孔向荣, 刘秀雄, 黎玉庭, 等. 高压交联聚乙烯电缆绝缘故障多组分气体浓度电化学传感器检测仪的设计与实现[J]. 通讯世界, 2017(12):126-127.

(下转第13页)

Oil-Immersed Transformer Fault Diagnosis Via Combining Neighborhood Rough Sets and Deep Belief Networks

LI Shuitian¹, HUANG Xuexiao¹, TIAN Wei², JIANG jing¹, Li Juntao³

(1. Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. Xinxiang Aviation Industry (Group) Co., Ltd., Xinxiang 453003, China; 3. College of Mathematics and Information Science, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

Abstract: In order to comprehensively explore fault information in transformer fault data and address the problem of fault type classification in oil-immersed transformers, a fault diagnosis model based on Neighborhood Rough Sets and Deep Belief Network (DBN) is proposed. Through non-coding ratio processing applied to fault gases within transformers, a total of 35 fault feature gas ratios are derived. These ratios undergo feature selection utilizing correlation analysis and the neighborhood rough set algorithm, aim at removing redundancies and irrelevant gas ratios that lack significance in identifying fault types. The resultant 9 selected gas ratios are utilized as input variables for the construction of a DBN diagnostic model intended for fault diagnosis in oil-immersed transformers. The effectiveness and accuracy of the proposed method were confirmed through experimental validation using dissolved gas analysis (DGA) data.

Key words: oil-immersed transformer; neighborhood rough sets; deep belief network; fault diagnosis
(责任编辑 吕春红)

(上接第 6 页)

[72] 陈鑫力. 废旧电线热解处理技术与中试试验研究 [D]. 天津: 天津大学, 2012.

[73] 张伟, 陈红, 李陈莹, 等. 高压电力电缆隧道火灾早期预警判据的实验研究 [J]. 火灾科学, 2021, 30(4): 232-241.

[74] 韩佳. 基于二氧化锡半导体气体传感器的 PVC 电缆火灾早期探测 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.

[75] 湛文佳, 易建新. PVC 电缆火灾早期特征气体的组成分析和传感器探测 [J]. 火灾科学, 2019, 28(2): 94-100.

Research Progress of Cable Fire Cause and Detection Technology in Utility Tunnel

WANG Weidong^{1,2}, WAN Liujie^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, HUANG Zhijie¹

(1. School of Cable Engineering, Henan Institute of Technology, Xinxiang 453003, China; 2. Henan Key Laboratory of Wire and Cable Structures and Materials, Xinxiang 453003, China)

Abstract: The ignition mechanism of cable fire in utility tunnel, the common cable fire detection technology and the research progress of cable pyrolytic gas are reviewed. In the aspect of fire mechanism, electric arc and overheating of cable core are the essential causes of cable fire in utility tunnel. At present, most of the research focuses on the combustion of cable materials caused by external heat source, while the research on the combustion caused by electric arc or cable internal overheating is scarce. In the aspect of cable fire detection technology in utility tunnel, the existing fire detection methods are summarized. According to the fire development process, the fire warning method based on gas detection technology can be used for early warning of cable fire. This paper has a certain reference significance for the operation and maintenance of the utility tunnel.

Key words: utility tunnel; cable fire; gas detection

(责任编辑 吕春红)